Bab 1
Penyelesaian Rekayasa Berbasis Komputer

1.1 Pendahuluan

Program komputer rekayasa (SAP2000, ETABS, STAD-III, GT-STRUDL, ANSYS, ABAQUS, ADINA) berbeda dengan program komputer umum (Word, Photoshop, Excel, AutoCAD) karena pengguna program komputer rekayasa dituntut untuk memahami latar belakang metode penyelesaian dan batasan-batasan yang dihasilkan program tersebut. Pada umumnya, developer program tidak mau bertanggung jawab untuk setiap kesalahan yang timbul akibat pemakaian program yang tidak benar, itu dapat dilihat dari berbagai kutipan *disclaimer* yang dinyatakan pada setiap manualnya seperti berikut.

> … The program has been thoroughly tested and used. In using the program, however, the user accepts and understands that no warranty is expressed or implied by the developers or the distributors on the accuracy or the reliability of the program. The user must explicitly understand the assumptions of the program and must independently verify the results.
>
> **SAP2000 - Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA**

> CA&SI does not guarantee the correctness or usefulness of the results obtained using PCGLSS, CA&SI is not liable for any conclusion or actions based on the result. It is the responsibility of the user to confirm the accuracy and usefulness of the results.
>
> **ANSYS – Computational Applications and System Integration Inc., Urbana, IL, USA**

> This manual is intended for qualified users who will exercise sound engineering judgment and expertise. The ABAQUS Software is inherently complex, …. Users are cautioned to satisfy themselves as to the accuracy and results of their analyses. ABAQUS, Inc. will not be responsible for the accuracy or usefulness of any analysis performed using the ABAQUS Software or the procedures, examples, or explanations in this manual.
>
> **ABAQUS, Inc., 166 Valley Street, Providence, RI 02909, USA**

Meskipun demikian, dalam manualnya selalu disajikan bukti perbandingan analisis yang menunjukkan bahwa program yang dibuatnya telah teruji, dapat menyelesaikan kasus-kasus tertentu yang telah terbukti hasilnya.

Dari kutipan tersebut, dapat dipahami bahwa satu sisi, developer mencoba meyakinkan pemakai bahwa program yang dibuat sudah ‘benar’, dengan cara membuktikannya pada problem tertentu yang dapat diselesaikan dengan baik. Sisi lain, developer tak mau bertanggung jawab bila ada kesalahan memakai program jika dipakai orang lain. Pengguna harus bertanggung jawab sendiri untuk tiap keputusan memakai hasil program tersebut. Kesimpulannya bahwa pemakaian program komputer rekayasa yang tidak benar dapat berpotensi menghasilkan kesalahan yang berisiko tinggi sehingga developer tidak mau dilibatkan menanggung kerugian yang timbul.

Untuk memakai program dengan ‘benar’ perlu memahami latar belakang teori yang dipakai program, memahami setiap opsi-opsi program yang dapat digunakan, termasuk input data yang tepat dan mengetahui sejauh mana solusi yang dihasilkan masih dapat diterima, misalnya ada lendutan yang besar (tanpa warning), apakah hasilnya dapat dipercaya, dan sebagainya.

Umumnya manual yang menyertai cukup lengkap, bahkan terlalu lengkap (baca: sangat tebal) dan untuk memahaminya tentunya tidak semudah seperti membaca buku cerita yang biasa, diperlukan latar belakang pendidikan yang mencukupi. Dalam konteks lain, disadari bahwa program-program rekayasa yang tersedia juga mengikuti trend *software* pada umumnya yang dilengkapi efek visual yang menarik, sehingga program yang dibuat semakin mudah digunakan tanpa perlu membaca secara khusus petunjuk dari manual yang disediakan. Keadaan tersebut juga ditunjang dengan tuntutan pasar bahwa pemakaian program komputer adalah sesuatu yang mutlak dalam bisnis yang semakin ketat ini karena memberikan kesan canggih yang membantu dalam segi marketing untuk jasa konsultasi teknik yang akan ditawarkan.

Tanpa perlu memahami teori lebih dalam, pemakai dapat secara mudah menjalankan program dan merasa sudah memahami betul program yang dipakainya. Apabila hal tersebut terjadi, saat itulah kemungkinan dapat terjadinya kesalahan dalam pemakaian program seperti yang dibayangkan developer yang dapat menimbulkan kerugian besar, baik dari segi ekonomi maupun keselamatan pengguna hasil rancangan dari program rekayasa.

Mengacu pada hal-hal tersebut, maka materi yang akan disajikan ditata sedemikian sehingga selain dapat memberikan keterampilan mengoperasikan program rekayasa (khususnya program SAP2000), juga dilengkapi dengan latar belakang pengetahuan yang diperlukan untuk memahami bagaimana program rekayasa tersebut menyelesaikan permasalahan. Salah satu metode penyajian materi adalah dengan memberi penyelesaian klasik cara manual untuk problem yang sama, atau mencari problem rekayasa dari pustaka-pustaka acuan yang mempunyai penyelesaian klasik manual, agar dapat dibandingkan dan dievaluasi hasil keduanya.

1.2 Komputer Rekayasa Struktur

1.2.1 Bukan Sekadar Alat

Komputer yang artinya penghitung merupakan alat bantu yang pertama-tama dikembangkan untuk bidang sain dan rekayasa. Hanya saja, sekarang telah berkembang semakin jauh, tidak hanya penghitung, tetapi juga penulis, pelukis, maupun penghibur dengan video dan tata-suaranya, serta lain-lain.

Dikaitkan dengan rekayasa konstruksi atau struktur, atau tepatnya *structural engineering* maka tugas utama komputer adalah sebagai penghitung seperti maksud awal alat tersebut diciptakan, yaitu dari asal kata *to compute*.

Akan tetapi, berbeda dengan alat hitung sebelumnya, ternyata komputer mengubah pola pikir bekerjanya insinyur dalam melakukan analisa struktur. Jika tradisi sebelumnya, untuk dapat memahami perilaku struktur dengan benar, maka harus memahami metode-metode perhitungan manual yang dilakukan, tetapi dengan tersedianya komputer untuk analisa struktur, maka tanpa mengetahui metode yang digunakan, insinyur dapat dengan mudah dan cepat memperoleh hasil yang diinginkan. Selain itu, berbagai model struktur dapat dengan mudah dibuat, termasuk manipulasi matematik yang diperlukan. Meskipun demikian, tidak ada jaminan bahwa itu semua membuat para insinyur dapat memahami perilaku struktur sebenarnya karena untuk itu perlu (a) paham asumsi-asumsi dasar analisis; (b) paham perilaku struktur yang sebenarnya; (c) mampu membuat model struktur dan validasi hasilnya.

Komputer untuk bidang rekayasa adalah alat bantu yang sangat berguna, bagi pengguna kompeten, maka dapat dihasilkan pemahaman yang lebih dalam tentang permasalahan bidang rekayasa, yang mana teknik-teknik tradisionil sebelumnya tidak mampu atau kesulitan mendapatkannya.

1.2.2 Prinsip Dasar Pemodelan Struktur

Pemodelan struktur adalah pembuatan data numerik (matematis) mewakili struktur real yang digunakan sebagai input data komputer. MacLeod (1990) mengusulkan sebaiknya dalam pembuatan model struktur adalah:

1. Jangan terlalu rumit dari yang diperlukan. Jika dapat dibuat model yang simpel tetapi representatif, maka umumnya itu yang akan berguna.

2. Berkaitan hal di atas, dalam pemodelan kadang-kadang perlu beberapa tahapan model. Ada yang secara keseluruhan (makro model) dan lainnya pada bagian-bagian tertentu saja tetapi lebih detail (mikro model). Jangan berkeinginan membuat model secara keseluruhan dengan ketelitian yang sama untuk setiap detail yang diinginkan (lihat uraian Sub-subbab 7.2.1).

3. Apakah modelnya simpel tapi masih representatif, maka perlu mengetahui perilaku struktur real. Faktor-faktor apa yang utama, atau sekunder yang dapat diabaikan. Tak ada jaminan bahwa banyak faktor maka hasilnya semakin baik (*lower bound theorem*). Contoh, jika deformasi lentur dihitung pada struktur *truss* (rangka batang), maka batangnya perlu ukuran yang lebih besar untuk menahan aksial dan lentur sekaligus (lebih boros).
4. Jangan langsung percaya pada hasil keluaran komputer, kecuali telah dilakukan validasi-validasi yang teliti dan ketat (apriori).
5. Meskipun sudah ada validasi-validasi yang ketat, jangan terlalu percaya dulu. Lihat asumsi-asumsi yang dipakai dalam pembuatan model analisis, apakah sudah logis dan mewakili kondisi struktur yang real (waspada).

1.2.3 Teknik Memahami Perilaku Struktur

Kemampuan memahami perilaku struktur real yang sebenarnya, menentukan kemampuan mengevaluasi keluaran komputer apakah sudah benar atau salah. MacLeod (1990) menunjukkan beberapa strategi yang terbukti cukup efektif digunakan memahami perilaku struktur yang dimaksud, yaitu:

1. **Observasi Fisik dan Hasil Uji**: Perilaku struktur normal tidak mudah diobservasi dengan mata telanjang karena deformasinya sangat kecil. Keruntuhan struktur adalah sumber berharga dipelajari, meskipun tentu jarang terjadi. Jika ditemui, himpunlah data sebanyak-banyaknya tentang kejadian tersebut. Keruntuhan struktur juga dapat diamati dari uji beban di laboratorium, meskipun itu tidak sepenuhnya mewakili kondisi real.

Gambar 1.1 Team UPH dan Observasi Keruntuhan Balok-Tinggi (2005)

Cara lain dengan mempelajari strategi perencanaan suatu struktur yang telah sukses dilaksanakan, memahami prediksi di atas kertas, dan membandingkan dengan kinerja sesungguhnya.

2. **Mempelajari Asumsi Dasar**: setiap metode analitis memerlukan asumsi atau batasan yang perlu dipahami, tidak ada metode yang berlaku general. Asumsi yang digunakan kadang-kadang dapat mengelompokkan jenis struktur mana yang 'sesuai' atau 'tidak sesuai' untuk metode tersebut sehingga dapat sekaligus dipelajari perilaku khas masing-masing struktur.
3. **Mempelajari Dasar Matematis Model**: persamaan differensial banyak digunakan dalam metode analitis. Itu didasarkan pada beberapa parameter tertentu juga, yang pada masing-masing struktur bisa berbeda. Memahami parameter tersebut secara benar bisa juga sekaligus karakter strukturnya.
4. **Studi Parametris**: tersedianya komputer berkapasitas besar dan cepat memungkinkan dibuat berbagai macam model dengan parameter yang beda. Pengaruh variasi parameter tersebut selanjutnya dipelajari dan dapat diambil suatu kesimpulan. Misal rangka batang (*truss*), maka parameter yang berpengaruh adalah A (luas), bentuk penampang tidak berpengaruh, sedangkan balok adalah I (inersia) bentuk penampang berpengaruh, dsb.
5. **Memakai Model Sederhana**: yang dapat diselesaikan secara manual dapat digunakan sebagai bahan perbandingan hasil solusi komputer. Dan apabila terdapat perbedaan, maka perlu dicari tahu dari mana itu terjadi. Misalnya hitungan portal dengan cara Cross dan komputer (lihat Bab 8).

1.2.4 Penggunaan Komputer Rekayasa

Wilayah kerja bidang rekayasa struktur/*structural engineering* perlu dipahami agar komputer dapat dimanfaatkan secara optimal, yaitu meliputi:

- Proses perancangan (analisis, desain, dan pembuatan gambar struktur)
- Proses fabrikasi (mengimplementasikan gambar dan spesifikasi rencana)
- Proses *erection*/pengangkutan/perakitan atau pelaksanaan itu sendiri
- Perawatan/perbaikan (*retrofit*)/evaluasi struktur

Dari berbagai tahapan di atas, yang paling banyak melibatkan komputer untuk maksud sebagaimana yang telah dibahas sebelumnya adalah dalam proses perancangan (dan evaluasi struktur), yang meliputi:

1. Pemodelan Sistem Struktur dan Analisanya

Tahap awal sebelum dilakukan analisa struktur adalah membuat model struktur, sebagai simulasi perilaku fisik struktur real agar dapat diproses melalui pendekatan numerik memakai komputer. Pemodelan tidak terbatas pada penyiapan data saja, tetapi model harus disesuaikan dengan problem

yang dianalisis, apakah itu tegangan, thermal, atau apa saja. Jadi, pembuat model dituntut harus memahami permasalahan yang akan diselesaikan. Apakah problem yang ditinjau dipengaruhi waktu (misal *creep*), apakah ada unsur-unsur non-linier (misal masalah keruntuhan), dan sebagainya. Dengan demikian, dapat ditentukan apakah suatu parameter harus ada, atau dapat dihilangkan tanpa mengurangi ketelitian. Dengan memahami permasalahan, dapat disusun suatu model analisis, tentu saja model dibatasi dengan ketersediaan metode penyelesaiannya.

Berbagai pendekatan dalam analisis model struktur untuk mengetahui perilaku terhadap pemberian beban, dikategorikan sebagai berikut.

- **Linier - Elastik**

Kata elastik menunjukkan bahwa suatu struktur akan berdeformasi jika diberi suatu pembebanan, dan akan kembali ke posisi awal jika pembebanan tersebut dihilangkan. Sedangkan linier menunjukkan hubungan antara beban dan deformasi bersifat linier/proporsional. Ciri-ciri penyelesaian linier-elastik adalah hasil penyelesaian dapat dilakukan superposisi antara satu dengan yang lain. Contoh Slope Deflection, Cross, dan Metode Matrik Kekakuan.

- **Non-Linier**

Analisa ini adalah lawan dari analisa Linier-Elastik, yaitu perilaku hubungan deformasi dan beban tidak proporsional. Deformasi pada suatu kondisi beban tidak bisa digunakan memprediksi deformasi pada kondisi beban lain hanya dengan mengetahui ratio beban-beban tersebut. Kondisi yang menyebabkan struktur dapat berperilaku non-linier dapat dikategorikan sebagai berikut.

- Non-Linier geometri: P-Δ efek, *large deformation analysis*
- Non-Linier material: Plastik, Yield
- Non-Linier tumpuan: gap (*contact problem*)

Analisa non-linier pada umumnya tidak untuk mencari kuantitas gaya-gaya internal atau lendutan yang terjadi, tetapi lebih diutamakan untuk mengetahui perilaku struktur terhadap pembebanan yang menyebabkan batas-batas dari persyaratan elastik-linier tidak terpenuhi. Misal perilaku keruntuhan struktur terhadap beban gempa, apakah bersifat daktail atau getas, dan sebagainya.

Ciri penyelesaian non-linier umumnya memakai iterasi dan hasilnya spesifik, tidak dapat disuperposisikan antara hasil satu dengan hasil yang lainnya.

Catatan: tidak semua software dapat menyelesaikan problem non-linier, non-linier geometri SAP2000 versi 7.40 hanya tahap P-Δ saja. Untuk *large deformation analysis* tidak mampu, sedang ANSYS (www.ansys.com) atau ABAQUS (www.abaqus.com) dapat dengan mudah melakukannya.

2. Desain Penampang

Diperlukan untuk mengevaluasi apakah penampang yang dipakai dalam analisa struktur memenuhi syarat kekuatan, kekakuan, atau daktilitas yang ditetapkan dalam peraturan yang berlaku. Acuan untuk evaluasi adalah *design-code* yang umumnya dikategorikan dalam dua cara, yaitu:

- Elastik/tegangan izin, misal Allowable Stress Design dari AISC, peraturan baja, atau kayu Indonesia yang lama.
- Ultimate/Limit State Design, misal ACI 318 - 2002 untuk struktur beton atau AISC-LFRD 1993 untuk struktur baja yang diadopsi di Indonesia sebagai SNI 03 – 1729 – 2000 yang baru.

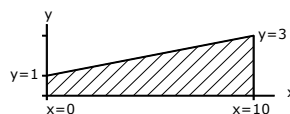
Analisis struktur dan desain penampang adalah dua bagian yang berbeda. Meskipun demikian, pada program-program tertentu, misalnya SAP2000, kedua opsi tersebut tersedia. Oleh sebab itu, memakainya harus hati-hati. Contoh, rangka batang/*truss* dengan profil siku tunggal dan H tidak ada bedanya dalam analisa struktur, tetapi dalam desain penampang, kedua profil mempunyai prosedur yang berbeda. Desain penampang profil siku tunggal belum ada di SAP2000 v 7.4, tetapi program dapat menghitung karena profil tersebut dianggap sama seperti profil H (Beta dan Wiryanto 2006).

3. CAD (*Computer Aided Drawing/Design*)

Agar dapat diwujudkan, perlu digambar struktur hasil rancangan. Untuk itu, tentu diperlukan program rekayasa lain yang khusus untuk penggambaran, yang paling populer di Indonesia adalah AutoCAD.

1.3 Solusi Umum Berbasis Komputer

Untuk memahami perilaku solusi berbasis komputer, diperlihatkan contoh penyelesaian klasik matematik dari luasan bidang sebagai berikut.

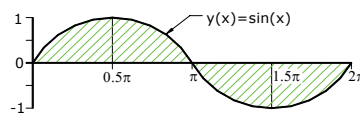
Linier

Gambar 1.2 Luas Persegi Empat

Oleh karena bentuknya sederhana, maka dengan mudah dihitung luas daerah dengan arsir, yaitu $A = 1*10 + (3-1)*10/2 = 20$, penyelesaian aljabar biasa.

Untuk bentuk-bentuk tertentu, agar dapat diselesaikan secara konsisten, maka cara integral adalah suatu pilihan yang masuk akal.

$$A=\int_{x=0}^{x=10} y(x)dx$$, untuk bentuk di atas, maka $y(x)=1+0.2x$ sehingga

$$A=\int_{x=0}^{x=10}(1+0.2x)dx=\left[x+\tfrac{0.2}{2}x^2\right]_0^{10}=10+0.1*10^2=20$$

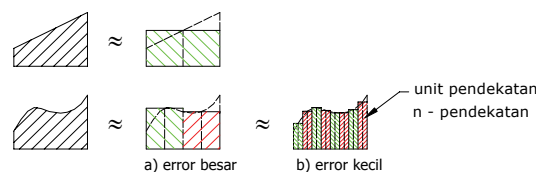
Bentuk integral di atas sangat berguna untuk menyelesaikan perhitungan luas penampang di bawah kurva yang bentuknya kompleks seperti berikut.

Gambar 1.3 Luas Kurva Sinus

Untuk mencari luas dengan aritmetika biasa, tentu saja susah. Penyelesaian eksak dengan cara integral akan lebih mudah, yaitu:

$$A=2\int_{x=0}^{x=\pi}\sin(x)dx=2[-\cos(x)]_0^{\pi}=4$$

Penyelesaian eksak integral di atas tidak dapat secara mudah atau langsung diselesaikan dengan komputer, perlu suatu metode tertentu, yaitu metode numerik yang menyelesaikan problem tersebut dengan cara pendekatan.

Penyelesaian numerik untuk integral

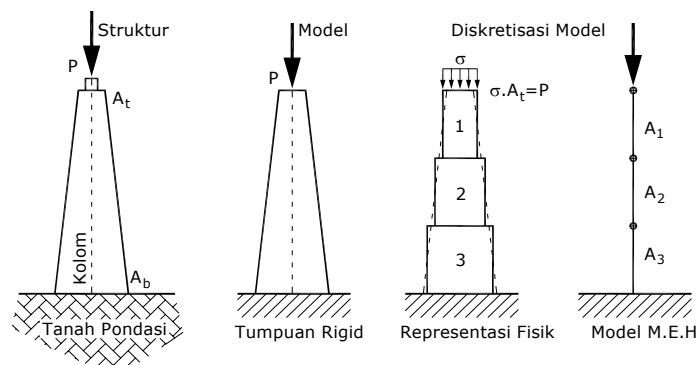
Cara pendekatan, misal seperti berikut.

Gambar 1.4 Pendekatan Mencari Luas di Bawah Kurva

Ciri-ciri penyelesaian numerik untuk integral mencari luasan di bawah kurva di atas dapat dirangkum sebagai berikut:

- Problem diselesaikan secara pendekatan,
- Unit pendekatan → suatu formulasi yang dianggap dapat mewakili fungsi yang ditinjau berdasarkan data sesederhana mungkin.
- n – pendekatan → semakin banyak semakin teliti.
- Ada proses pengulangan, iterasi, looping.

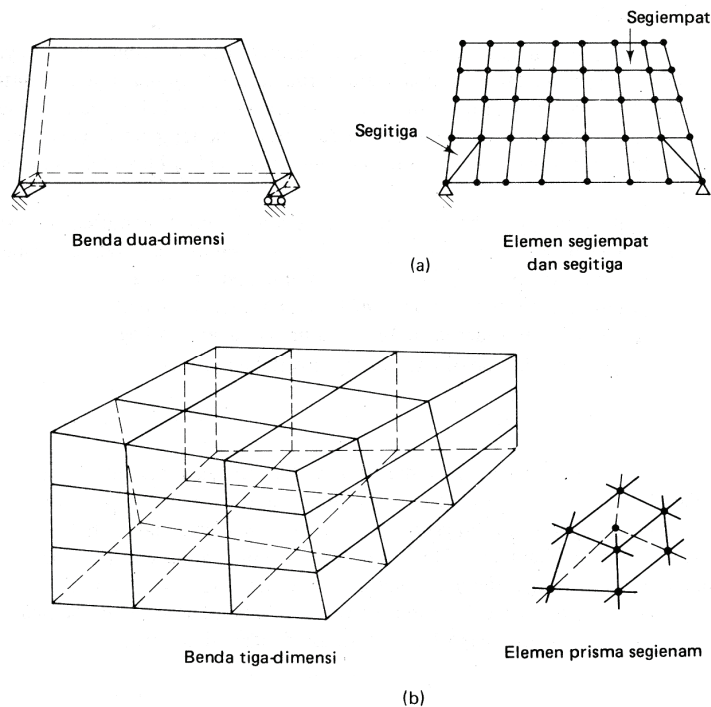
1.4 Analisa Struktur Berbasis Komputer

Penyelesaian dilakukan dengan membagi model menjadi element-element kecil. Adapun element (≠ elemen) adalah identik dengan 'unit pendekatan', yaitu suatu formulasi matematis dari suatu model struktur yang dianggap sebagai representasi yang paling mendekati sifat struktur real.

Sifat struktur real tentu dapat berbeda-beda, umumnya dapat difokuskan pada sifat-sifat dominan yang ada, mulai dari kondisi tumpuan (tanah/pondasi), cara penyaluran beban (lentur atau aksial atau keduanya) maupun sifat fisik struktur itu sendiri, batang langsing atau bidang atau solid 3D.

Gambar 1.5 Tahapan Umum dalam Pemodelan Struktur

Gambar 1.5 memperlihatkan proses pemodelan tiang non-prismatis dengan beban sentris. Mula-mula tanah pondasi dapat dianggap sebagai tumpuan rigid karena hanya menahan gaya aksial. Anggapan tersebut belum tentu benar jika beban yang bekerja adalah eksentris hingga timbul momen guling.

Kondisi tiang non-prismatis selanjutnya didekati sebagai tiang-tiang prismatis yang ukurannya bervariasi dari bawah ke atas. Ingat, semakin banyak tiang-tiang prismatis yang digunakan, maka perilakunya akan semakin mendekati kondisi tiang real (tiang non-prismatis). Selanjutnya tiang-tiang prismatis akibat beban sentris hanya akan mengalami deformasi aksial saja sehingga bila tiang prismatis tersebut dimodelkan sebagai element satu dimensi masih memungkinkan. Adapun parameter geometri yang dominan adalah luasan (A) dan panjang (L) penampang tiang prismatis.

Element satu dimensi pada program SAP2000 adalah element FRAME. Dalam kenyataannya, tidak semua struktur selalu dapat dimodelkan sebagai element satu dimensi. Untuk kasus-kasus tertentu diperlukan model element dua dimensi atau bahkan tiga dimensi, seperti terlihat pada Gambar 1.6.

Gambar 1.6 Pemodelan Struktur 2D dan 3D

1.5 Sumber Pustaka

1. Beta Patrianto dan Wiryanto Dewobroto, *Evaluasi Metode Perencanaan Batang Aksial Murni SNI-03-1729-2000 dan AISC-LRFD*, Civil Engineering Conference: Toward Sustainable Civil Engineering Practice, Universitas Kristen PETRA, Surabaya, 25-26 Agustus 2006.

2. Ian A. MacLeod, *Analytical Modelling of Structural Systems: an entirely new approach with emphasis on the behaviour of building structures*, Ellis Horwood, England, 1990.

3. Manual Program, *SAP2000® Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures: ANALYSIS REFERENCE*, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, Version 7.0, October 1998.